



①⑨ BUNDESREPUBLIK  
DEUTSCHLAND



DEUTSCHES  
PATENT- UND  
MARKENAMT

⑫ **Gebrauchsmuster**  
⑩ **DE 298 22 090 U 1**

⑤① Int. Cl.<sup>6</sup>:  
**H 01 S 3/08**  
H 01 S 3/225

⑦① Aktenzeichen:	298 22 090.3
②② Anmeldetag:	10. 12. 98
④⑦ Eintragungstag:	11. 2. 99
④③ Bekanntmachung im Patentblatt:	25. 3. 99

DE 298 22 090 U 1

⑦③ Inhaber: Lambda Physik Gesellschaft zur Herstellung von Lasern mbH, 37079 Göttingen, DE	
⑦④ Vertreter: WUESTHOFF & WUESTHOFF Patent- und Rechtsanwälte, 81541 München	

⑤④ Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung

DE 298 22 090 U 1

1G-81 274  
LAMBDA PHYSIK

### Lasér zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung

Die Erfindung betrifft einen Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich, einem Auskoppelspiegel, einem Strahlaufweiter und einem wellenlängenselektiven Element, auf das Strahlung trifft.

Insbesondere betrifft die Erfindung Excimerlaser der vorstehend genannten Art.

Die Erfindung befaßt sich mit dem Problem, bei einem solchen Laser möglichst schmalbandige Strahlung mit hoher Stabilität zu erzeugen. Dies ist insbesondere beim Einsatz in der Fotolithographie zur Erzeugung integrierter Schaltungen wichtig. Hierzu sind Wellenlängen  $< 250$  nm erforderlich, um Strukturen mit Abmessungen  $< 0,25$   $\mu\text{m}$  zu erzeugen (für Strukturen mit Abmessungen  $< 0,18$   $\mu\text{m}$  sind Wellenlängen  $< 200$  nm erforderlich). In solchen Wellenlängenbereichen sind achromatisch abbildende Optiken kaum herstellbar. Deshalb muß die verwendete Strahlung sehr schmalbandig sein, um die Abbildungsfehler aufgrund der chromatischen Aberration klein zu halten. Im Einsatzbereich der Fotolithographie, um die es bei der vorliegenden Erfindung insbesondere geht, sind für brechende Abbildungsoptiken Bandbreiten im Bereich  $< 0,6$  nm akzeptabel.

Eine andere wichtige Strahlungseigenschaft bei solchen Verwendungen der Strahlung ist die sogenannte spektrale Reinheit. Die spektrale Reinheit der Strahlung kann z.B. durch dasjenige Wellenlängenintervall angegeben werden, in dem 95 % der gesamten Pulsenergie liegt. Die Bandbreite und in noch höherem Maß die spektrale Reinheit der Strahlung werden u.a. bestimmt durch die Divergenz  $\theta$  oder auch durch die Wellenfrontkrümmung  $R$  des Strahls. Fig. 1 zeigt schematisch einen herkömmlichen Excimerlaser mit einem laseraktiven Bereich 1 (also dem Plasma einer Gasentladung), einem Auskoppelspiegel 2, einem Strahlaufweiter 3

und einem wellenlängenselektiven Element 5 in Form eines Gitters. Das strahlaufweitende Element 3 dient zur Verringerung der Divergenz und zur Verringerung der Wellenfrontkrümmung vor dem wellenlängenselektiven Element 5. Fig. 2 zeigt schematisch einen Strahl, wobei der Randstrahl (und Radius) mit R bezeichnet ist. OA ist die optische Achse und  $\theta$  ist der Divergenzwinkel. Für den Abstand h des Randpunktes der Wellenfront von der optischen Achse OA gilt ohne Verwendung eines Strahlaufweiters  $\theta = h/R$ . Dies ist in Fig. 2 links dargestellt. In Fig. 2 rechts ist der Strahl bei Verwendung eines Strahlaufweiters gezeigt, wobei der Aufweitungsfaktor M ist. Dann gilt:  $h' = M \cdot h$ ;  $\theta' = \theta/M$ , und  $R' = M^2 \cdot R$ .

Der Stand der Technik kennt bereits einen Versuch, eine Wellenfrontkrümmung zu kompensieren (U.S. Patent 5,095,492; R.L. Sandstrom). Dort wird das Gitter verändert, was jedoch Nachteile hat, insbesondere hinsichtlich des Ausmaßes, in dem eine Wellenfrontkrümmung korrigiert werden kann. In einer U.S. Patentanmeldung (Erfinder: D. Basting und S. Govorkov) wird zur Kompensation einer Wellenfrontkrümmung eine zusätzliche Zylinderlinse in den Laserresonator eingesetzt (U.S. Anmeldung vom 22.6.1998).

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Laser der eingangs genannten Art so auszugestalten, daß mit einfachen und zuverlässigen Mitteln eine Korrektur der Wellenfrontkrümmung möglich ist, und weiterhin der Status der Wellenfrontverzerrung kontrolliert werden kann.

Die Erfindung erreicht diese Ziele durch Einrichtungen zum Einstellen der Wellenfront, also insbesondere zum Korrigieren und Ändern der Wellenfrontkrümmung, wobei die Einrichtungen ein optisches Element aufweisen, dessen optische Eigenschaften veränderbar sind. Eine solche Einrichtung ist z.B. ein veränderbarer, insbesondere verformbarer Spiegel.

Eine Variante der Erfindung erreicht die oben genannten Ziele durch Einrichtungen zum Messen einer Wellenfront und zum Abgeben eines Meßergebnisses sowie durch Einrichtungen zum Einstellen der Wellenfront entsprechend dem Meßergebnis. Diese Ausgestal-

tung der Erfindung eignet sich besonders zur Einrichtung eines geschlossenen Regelkreises, bei dem die Wellenfront durch Messung jeweils auf einen optimalen Wert, d.h. einen Wert mit möglichst geringer Wellenfrontkrümmung, geregelt wird.

Der Erfindungsgedanke läßt sich also sowohl statisch mit auf für ein gegebenes Lasersystem optimal (fest) eingestellten optischen Elementen verwirklichen als auch (in einer fortgeschritteneren Ausgestaltung) dynamisch durch Messung der Wellenfrontkrümmung und entsprechender Einstellung einer Wellenfrontkorrektur, insbesondere in Form eines Regelkreises.

Die Erfindung ermöglicht also die Herstellung einer Wellenfront mit einer möglichst geringen Krümmung, insbesondere unmittelbar vor dem Auftreffen auf das wellenlängenselektive Element. Bei dem wellenlängenselektiven Element kann es sich bevorzugt um ein Gitter handeln, es kommen aber auch andere Einrichtungen in Betracht, die dem Fachmann bekannt sind.

Bei Verwendung eines ebenen Gitters als wellenlängenselektives Element wird die höchste spektrale Reinheit dann erreicht, wenn die Wellenfront keine Krümmung aufweist, also sich der Krümmungsradius  $R'$  (Fig. 2, rechts) gegen Unendlich nähert. Bei praktischen Lasersystemen läßt sich eine Wellenfrontkrümmung aus mehreren Gründen nicht vermeiden, so daß die oben genannten erfindungsgemäßen Korrekturvorrichtungen für die Erzeugung schmalbandiger Strahlung erforderlich sind. Die Ursachen der Wellenfrontkrümmung sind insbesondere darin zu sehen, daß Strahlen, die nicht exakt parallel zur optischen Achse des Lasers verlaufen, auch in dem Resonator verstärkt werden, daß die optischen Komponenten in aller Regel nicht völlig ebene Oberflächen haben, daß im Volumen der optischen Komponenten Änderungen des Brechungsindex auftreten können, und daß die Strahlung selbst Änderungen des Brechungsindex im Volumen der optischen Komponenten erzeugen kann.

Als optisches Element, dessen optische Abbildungseigenschaften zur Korrektur einer Wellenfrontkrümmung veränderbar sind, kommt bei den oben genannten erfindungsgemäßen Einrichtungen insbesondere ein Spiegel in Betracht, der verformbar ist.

Weitere bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Schutzansprüchen beschrieben.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der schematischen Zeichnungen erläutert. Es zeigt:

- Fig. 1 einen herkömmlichen Aufbau eines Excimerlasers;
- Fig. 2 Laserstrahlen mit hier interessierenden Parametern, wie sie oben erläutert sind, links ohne und rechts mit Strahlaufweitung,
- Fig. 3 ein erstes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Lasers;
- Fig. 4 eine Abwandlung der Einrichtungen zur Wellenfrontkorrektur bei einem Lasersystem gemäß Fig. 3;
- Fig. 5 und 6 Beispiele für eine Fernfeld-Intensitätsverteilung, nämlich ohne Wellenfrontkorrektur (Fig. 5) und mit Wellenfrontkorrektur (Fig. 6);
- Fig. 7 und 8 zeigen beispielhaft gemessene Spektren von Laserstrahlung, einmal ohne Wellenfrontkorrektur (Fig. 7) und einmal mit Wellenfrontkorrektur (Fig. 8); und
- Fig. 9 ein zweites Ausführungsbeispiel eines Lasersystems mit Einrichtungen zur Wellenfrontkorrektur.

In den Figuren haben funktionsgleiche Bauteile die gleichen Bezugszeichen. Insoweit entsprechen also das laseraktive Medium 1, der Auskoppelspiegel 2, der Strahlaufweiter 3 und das Gitter 5 beim erfindungsgemäßen Lasersystem gemäß Fig. 3 einem herkömmlichen Aufbau eines Excimerlasers, wie er oben anhand der Fig. 1 erläutert ist. In den Figuren wird der Strahlaufweiter 3 durch ein einziges Prisma symbolisch angedeutet. Tatsächlich bestehen Strahlaufweiter in der Regel aus z.B. mehreren Prismen.

Das beim Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 3 vom Strahlaufweiter 3 kommende Licht weist also eine gekrümmte Wellenfront auf (Fig. 2, rechts). Dieses Licht wird in eine Einrichtung 4 zum Einstellen der Wellenfront eingegeben. Die Einrichtung 4 weist einen deformierbaren Spiegel 4a auf, an dem das Licht zum Gitter 5 reflektiert wird. Weiterhin ist schematisch eine Betätigungsein-

richtung 4b für die Deformierung des Spiegels 4a angedeutet. Bei der Betätigungseinrichtung 4b kann es sich z.B. um eine mechanische Einrichtung zum Deformieren (Verformen) des Spiegels 4a handeln oder auch um eine thermische Einrichtung für diesen Zweck. Z.B. kann damit die Krümmung des Spiegels 4a geändert werden. Das Gitter 5 selektiert Wellenlängen und reflektiert nur einen schmalbandigen Bereich zurück zum Spiegel 4a. Die Strahlung gelangt dann wieder zurück zum Strahlaufweiter 3, wo die Strahlbreite komprimiert wird. Danach passiert die Strahlung wieder die Gasentladungskammer 1 und das laseraktive Medium und wird dort weiter verstärkt. Ein (geringer) Teil der Strahlung wird mittels eines Strahlteilers 6a in Fig. 3 nach oben abgelenkt. Der Strahlteiler 6a ist Teil einer Einrichtung 6 zum Ermitteln der Wellenfront-Krümmung. Nach Fokussierung durch eine Linse 6b aus Schmelzquarz, gelangt die abgezweigte Strahlung auf einen Festkörperbildsensor 6c (z.B. ein CCD-Array). Die Linse 6b hat eine Brennweite  $f$  und der Festkörperbildsensor 6c ist in der Brennebene der Linse angeordnet. Der Festkörperbildsensor 6c ermittelt die Fernfeld-Intensitätsverteilung des Strahlungsfeldes im Laserresonator. Die Einrichtung 6 ermittelt also eine Kenngröße für die Qualität der Wellenfront. Soll die Winkelvergrößerung noch verstärkt werden, kann ein zusätzlicher Strahl-Kompri- mierer im Strahlengang zwischen dem Strahlteiler 6a und der Linse 6b angeordnet werden.

Das vom Festkörperbildsensor 6c gelieferte elektrische Meßsignal bezüglich der Fernfeld-Intensitätsverteilung (und damit bezüglich der Wellenfront-Krümmung) wird an eine Steuerung 7 gegeben, die wiederum mittels eines Rechners die Daten auswertet und entsprechend der erforderlichen Korrektur der Wellenfront die Betätigungseinrichtung 4b so beaufschlagt, daß der Spiegel 4a verformt wird, bis die mit der Einrichtung 6 gemessene Wellenfront-Krümmung einen optimalen (minimalen) Wert hat. Hierzu können z.B. die gemessenen Werte des Festkörperbildsensors mit im Rechner der Einrichtung 7 gespeicherten Werten verglichen werden. Für die Steuerung der Einstelleinrichtung 4 eignet sich insbesondere die Fernfeld-Intensitätsverteilung auf der Achse. Die Einstelleinrichtung 4, also beim Ausführungsbeispiel der verformbare Spiegel 4a, wird so verformt, daß die Fernfeld-Inten-

sitätsverteilung auf der Achse ein Maximum hat. Diese Einstellung wird automatisch durch den Rechner der Steuerung 7 durchgeführt.

Die Fig. 5 und 6 zeigen Meßergebnisse. In den Figuren ist die Intensität (in willkürlichen Einheiten) über der Wellenlänge aufgetragen. Gemessen ist die Intensitätsverteilung im Fernfeld. Fig. 5 zeigt deutlich die Aufspaltung dieser Intensitätsverteilung mit zwei Spitzen (peaks). Diese Aufspaltung wird durch die starke Wellenfrontstörung, insbesondere im Strahlaufweiter, verursacht. Fig. 6 zeigt die Meßergebnisse nach Korrektur der Wellenfrontkrümmung mittels der Korrektoreinrichtungen 6 und 4, die anhand der Fig. 3 erläutert wurden. Die Aufspaltung der Intensitätsverteilung ist im wesentlichen verschwunden, was anzeigt, daß die Wellenfront-Krümmung im wesentlichen zum Verschwinden gebracht worden ist durch Einstellung des Spiegels 4a.

Die Fig. 7 und 8 zeigen die gemessenen Spektren ohne Kompensation der Wellenfrontkrümmung (Fig. 7) und mit Kompensation der Wellenfrontkrümmung (Fig. 8). Auf Grund der fehlenden Wellenfrontkorrektur zeigt das Spektrum von Fig. 7 eine Aufteilung der spektralen Verteilung in zwei getrennte Frequenzen.

Fig. 9 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel eines Lasersystems mit Korrektur der Wellenfront-Krümmung. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist ein Teleskop 4' (z.B. vom Cassegrain-Typ) gleichzeitig Teil des Strahlaufweiters und Einrichtung zum Korrigieren einer Wellenfront-Krümmung. Das Teleskop 4' weist zwei hochreflektierende Spiegel 4a', 4b' auf, mit jeweils elliptisch geformten Oberflächen. Das Teleskop 4' hat zwei Funktionen: Zum einen bewirkt es eine Strahlaufweitung in Richtung senkrecht zu den Ritzen des Gitters 5 und zum anderen bewirkt es eine Wellenfrontkorrektur (Begradigung der Wellenfront-Krümmung). Die Wellenfrontkorrektur kann durch Einstellen des Abstandes d zwischen den beiden Spiegeln 4a' und 4b' vorgenommen werden. Im Strahlengang zwischen dem Teleskop 4' ist ein weiterer Strahlaufweiter 3 schematisch dargestellt. Die übrigen Bauteile sind mit gleichen Bezugszeichen anhand der Fig. 3 oben erläutert.

10.12.90

1G-81 274  
LAMBDA PHYSIK

## SCHUTZANSPRÜCHE

1. Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich (1), einem Auskoppelspiegel (2), einem Strahlaufweiter (3) und einem wellenlängenselektiven Element (5), auf das Strahlung trifft, gekennzeichnet durch Einrichtungen (6) zum Messen einer von der Wellenfront der Strahlung abhängigen Größe und zum Abgeben eines Meßergebnisses, und Einrichtungen (4, 7) zur Korrektur der Wellenfront in Abhängigkeit von dem Meßergebnis.
2. Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich (1), einem Auskoppelspiegel (2), einem Strahlaufweiter (3) und einem wellenlängenselektiven Element (5), auf das Strahlung trifft, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (4a) zur Korrektur der Wellenfront, die auf das wellenlängenselektive Element (5) auftrifft, wobei die Einstelleinrichtung (4a) hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften veränderbar ist.
3. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen zum Korrigieren der Wellenfront ein in seinen optischen Eigenschaften veränderbares Element (4a) enthalten.
4. Laser nach einem der Ansprüche 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) verformbar ist.
5. Laser nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) ein Spiegel ist.
6. Laser nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) im Strahlengang zwischen zumindest einem Element (3; 3a) des Strahlaufweiters und dem wellenlängenselektiven Element (5) angeordnet ist.



7. Laser nach einem der Ansprüche 1 oder 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (6) zum Messen der Wellenfront einen Festkörper-Bildsensor (6c) aufweisen.
8. Laser nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (6) zum Messen der Wellenfront fokussierende optische Mittel (6b) aufweisen und daß der Festkörper-Bildsensor (6c) in der Fokusebene der abbildenden Elemente liegt.
9. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Meßeinrichtung (6) als Maß für die Wellenfrontkorrektur die Amplitude im Zentrum der Fernfeld-Intensitätsverteilung genutzt wird.
10. Laser gemäß Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (4') zum Einstellen der Wellenfront ein Teleskop (4a', 4b') aufweisen, insbesondere ein Cassegrain-Teleskop.
11. Laser nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenfront durch Einstellung eines Abstandes (d) von Elementen (4a', 4b') des Teleskops (4') einstellbar ist.
12. Laser nach einem der Ansprüche 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Teleskop Spiegel (4a', 4b') aufweist zum Reflektieren des Strahlenganges des Lasers und daß die Spiegel entsprechend einem Kegelschnitt geformt sind, insbesondere parabolisch, elliptisch oder hyperbolisch.
13. Laser nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest ein Spiegel des Teleskops deformierbar ist.
14. Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß er ein Excimerlaser ist.

FIG.1

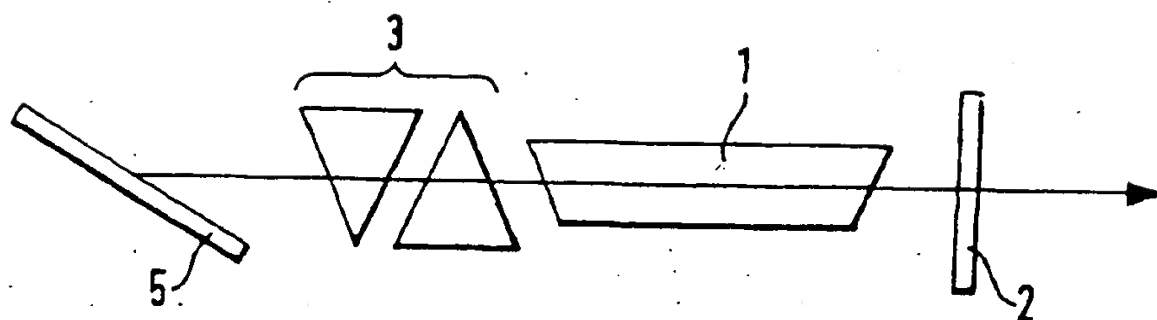
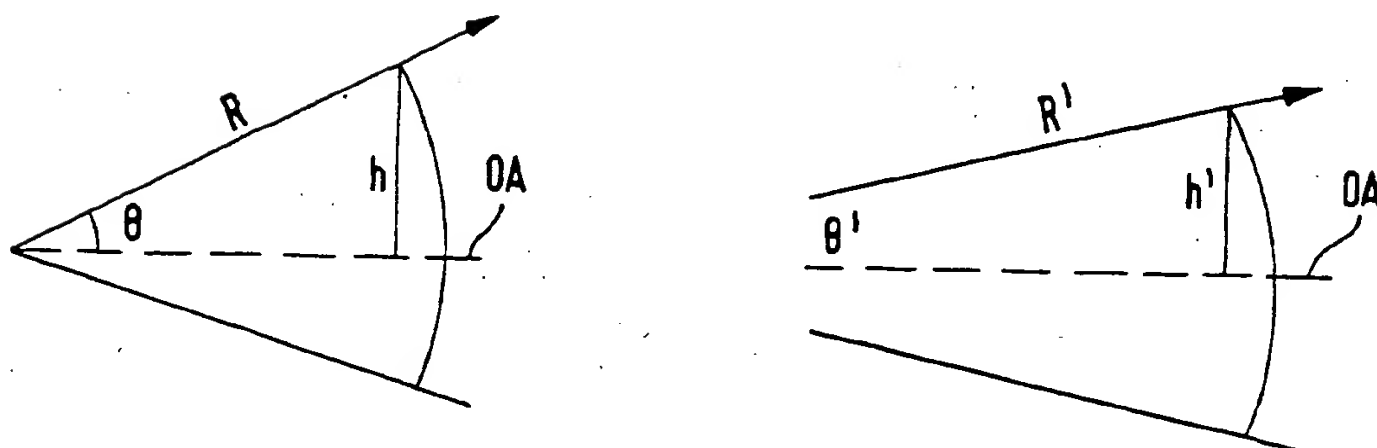


FIG.2



10-12-48

FIG. 3

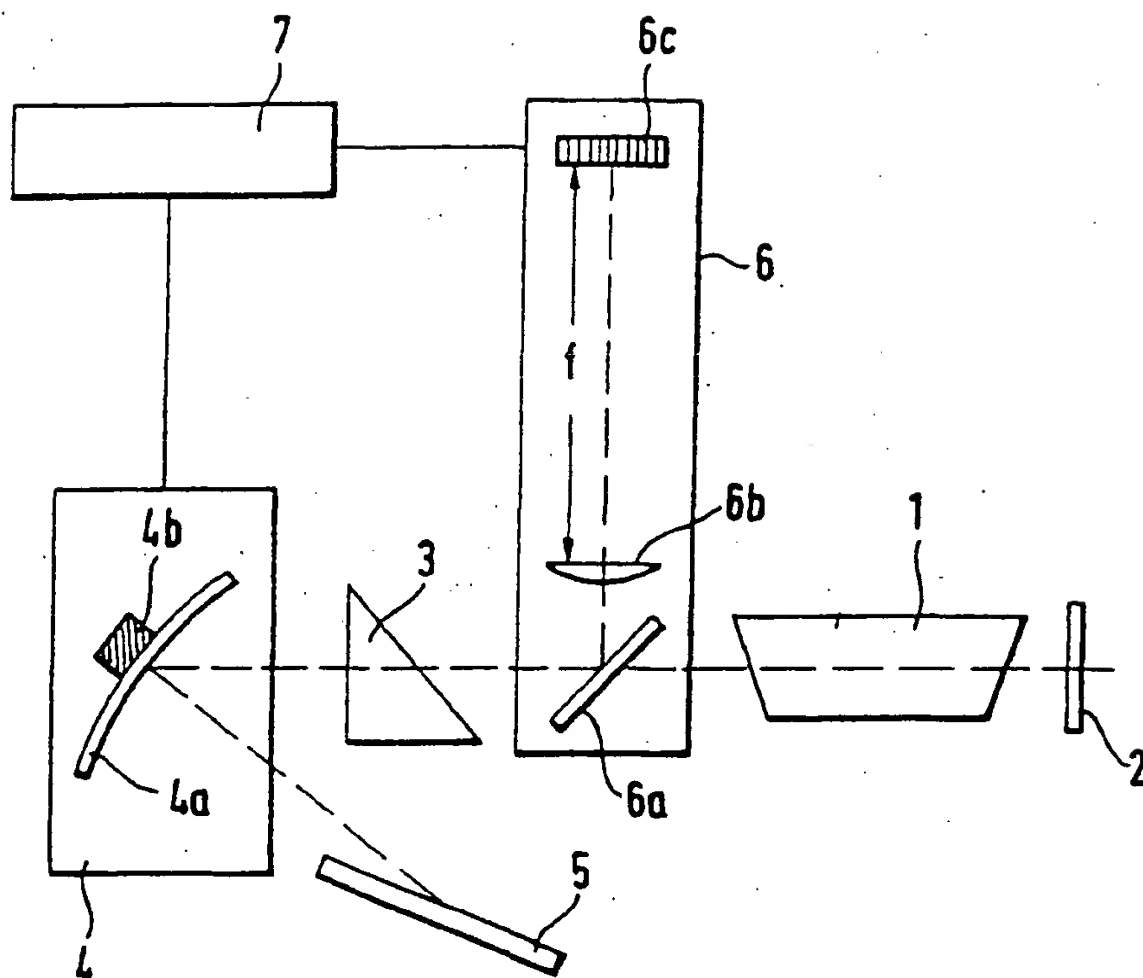
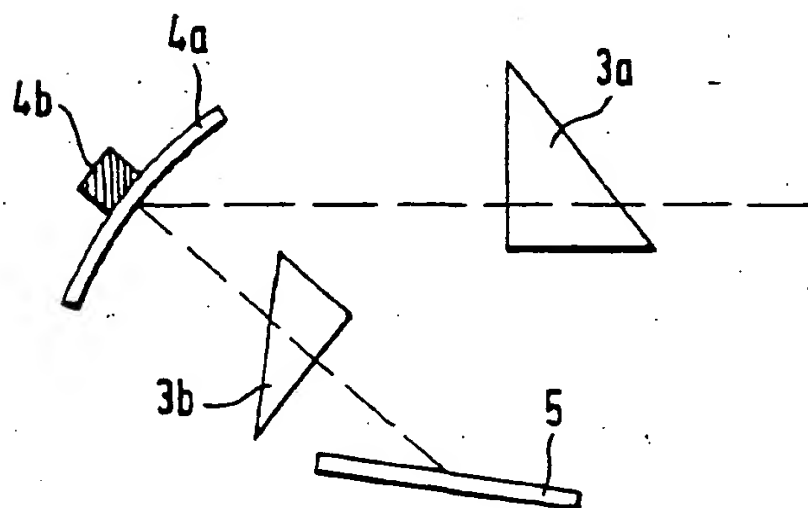


FIG. 4



10.12.99

FIG.5

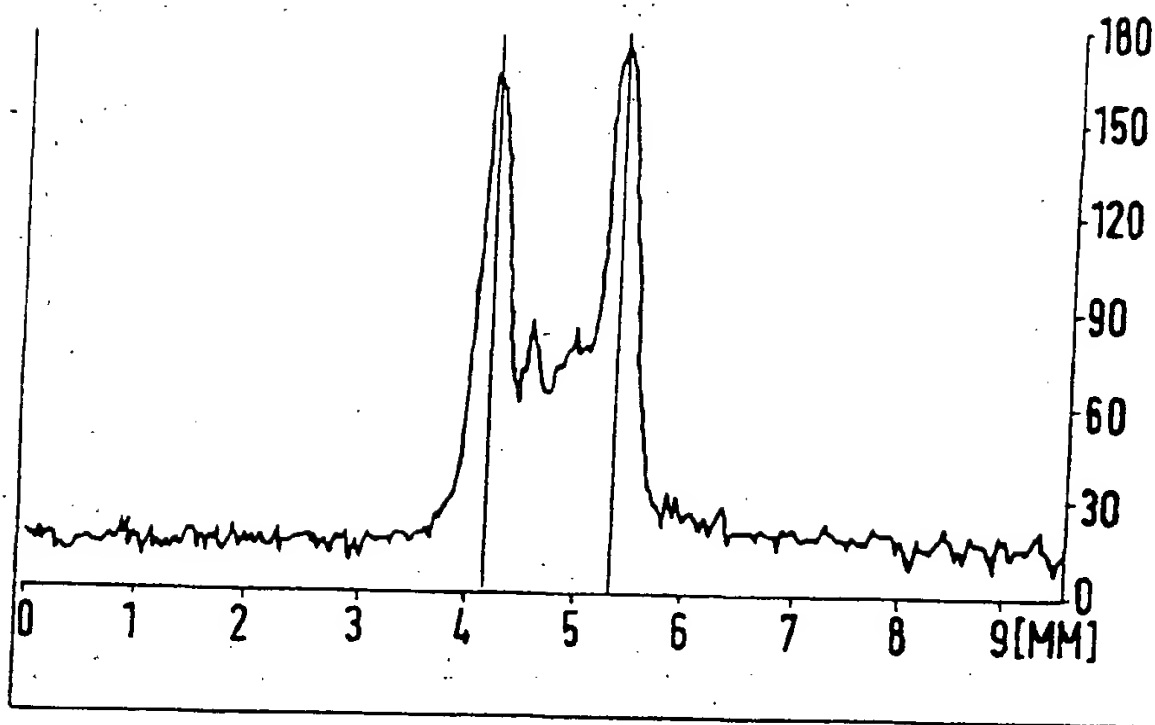
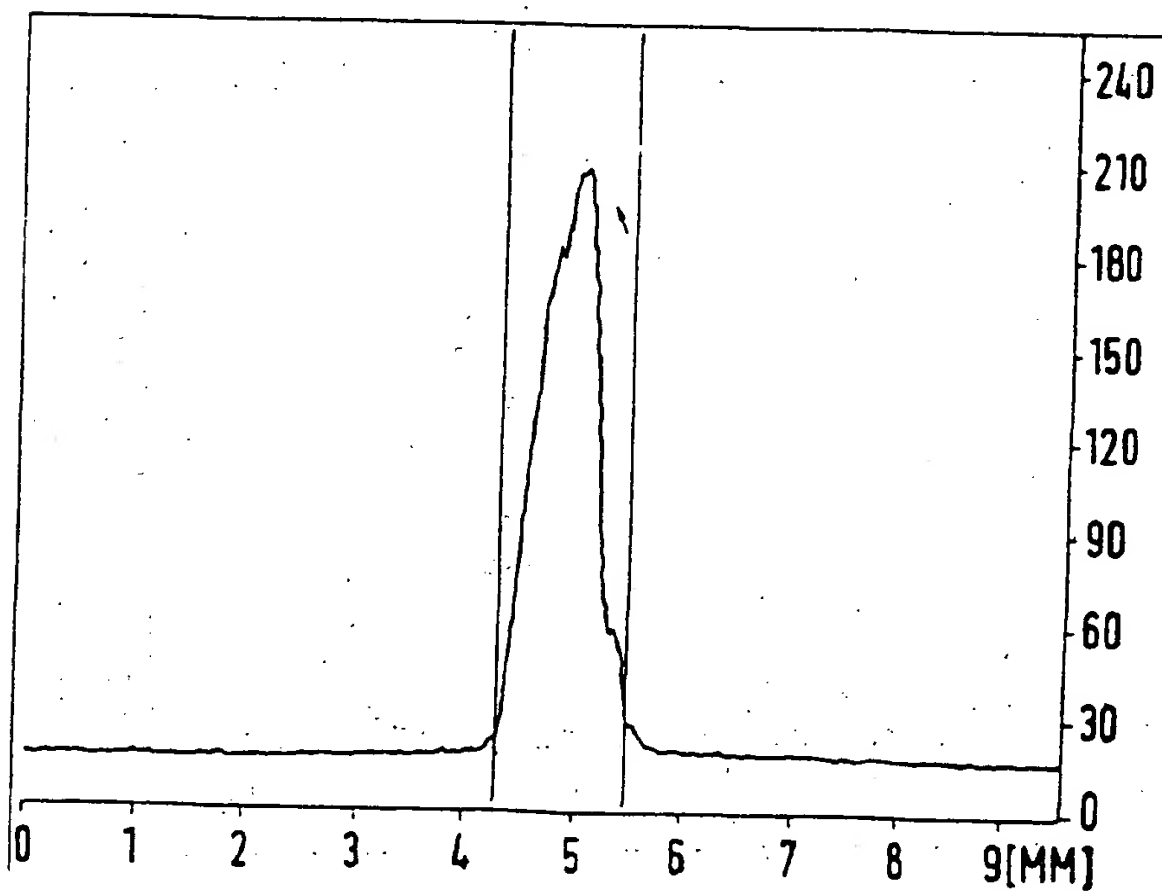


FIG.6



10.12.90

FIG.7

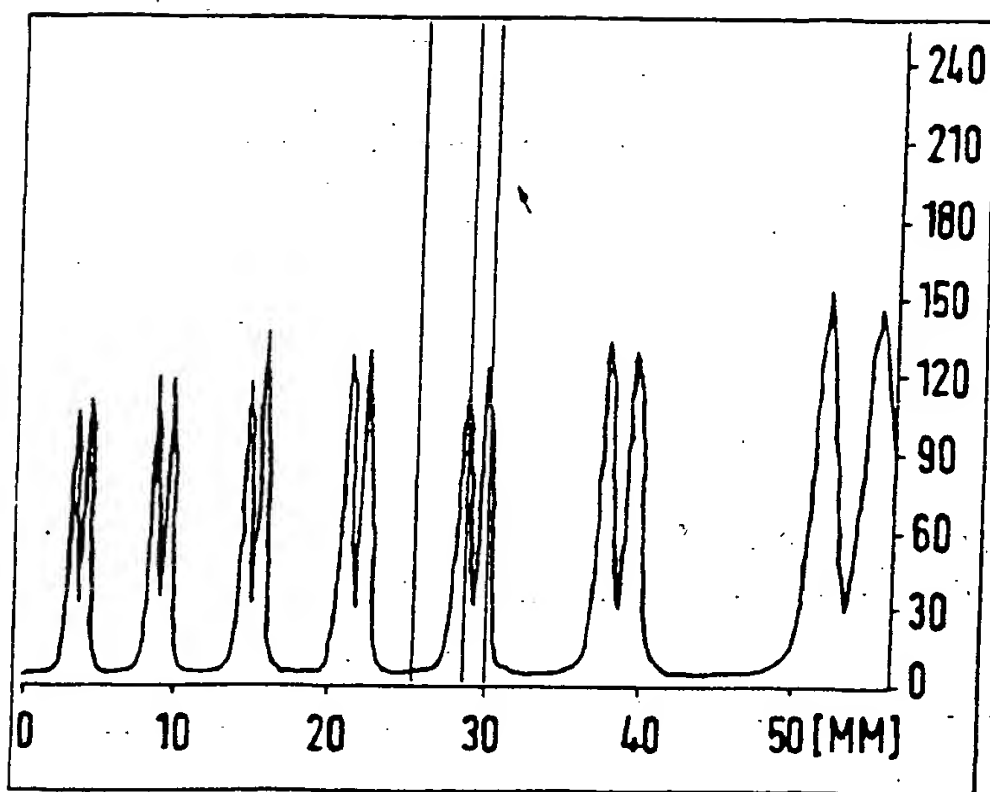
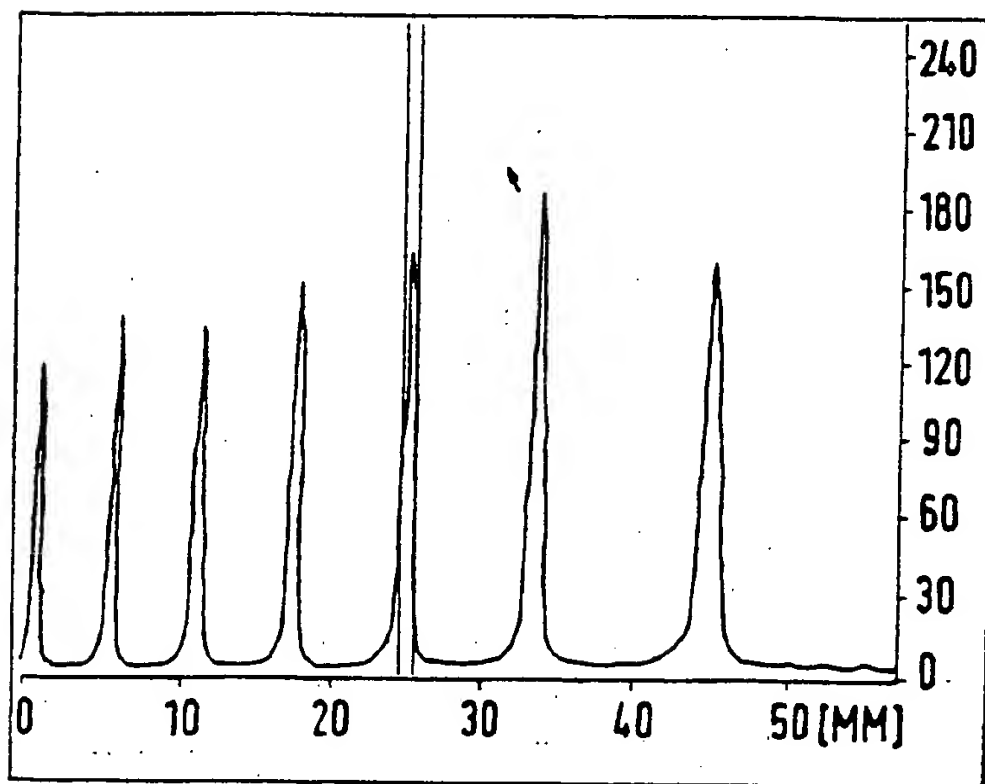


FIG.8





IDEM JOB 01-05-067

## CERTIFICATION OF ACCURACY

I CERTIFY, UNDER PENALTY OF PERJURY UNDER THE LAWS OF THE UNITED STATES OF AMERICA THAT WE ARE COMPETENT IN ENGLISH AND **GERMAN** AND THAT THE FOLLOWING PAGES ARE, TO THE BEST OF OUR KNOWLEDGE AND BELIEF, A TRUE, CORRECT, COMPLETE AND ACCURATE TRANSLATION OF THE ORIGINAL DOCUMENT.

MAY 10, 2001

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Karolina H. Lorry', is written over a horizontal dashed line.

KAROLINA H. LORRY  
IDEM TRANSLATIONS, INC.

1G-81 274  
LAMBDA PHYSIK

## PROTECTION CLAIMS

1. Laser for the generation of narrow-band radiation with a laser-active region (1), a decoupling mirror (2), a beam spreader (3) and a wave-length selective element (5), on which radiation impinges, characterized by devices (6) for the measurement of a value depending on the wave front of the radiation and to provide a measurement result, and devices (4, 7) for the correction of the wave front, depending upon the measurement results.
2. Laser for the generation of narrow-band radiation with a laser-active region (1), a decoupling mirror (2), a beam spreader (3) and a wave-length selective element (5), on which radiation impinges, characterized by an device (4a) to correct the wave front that impinges on the wave-length selective element (5), where the adjusting device (4a) can be changed with respect to its optical properties.
3. Laser in accordance with Claim 1, characterized in that the devices for the correction of the wave front contain an element (4a) whose optical properties can be changed.
4. Laser in accordance with one of the Claims 2 or 3, characterized in that the changeable element (4a) is deformable.
5. Laser in accordance with Claim 4, characterized in that the changeable element (4a) is a mirror.
6. Laser in accordance with one of the Claims 2 through 5, characterized in that the changeable element (4a) is placed in the beam path between at least one element (3; 3a) of the beam spreader and the wave-length selective element (5).
7. Laser in accordance with one of the Claims 1 or 3 through 6, characterized in that the devices (6) for measuring the wave front contain a solid-state (6c) image sensor.
8. Laser in accordance with Claim 7, characterized in that the devices (6) for the measurement of the wave front contain optical focusing means (6b), and that the solid-state image sensor (6c) lies in the focal plane of the imaging elements.
9. Laser in accordance with Claim 1, characterized in that, in the measuring device (6), the amplitude in the center of the distant field intensity distribution is used as a measurement for the wave front correction.
10. Laser in accordance with Claim 1 or 2, characterized in that the devices (4') for the adjustment of the wave front contain a telescope (4a', 4b'), especially a Cassegrain telescope.

11. Laser in accordance with Claim 10, characterized in that the wave front is adjustable by adjusting a distance (d) of elements (4a', 4b') of the telescope (4').
12. Laser in accordance with one of the Claims 10 of 11, characterized in that the telescope has mirrors (4a', 4b') to reflect the beam path of the laser and that the mirrors are shaped corresponding to a conical section, especially parabolically, elliptically or hyperbolically.
13. Laser in accordance with one of the Claims 10 through 12, characterized in that at least one mirror of the telescope is deformable.
14. Laser in accordance with one of the foregoing Claims, characterized in that it is an excimer laser.



1G-81 274  
LAMBDA PHYSIC

### **Laser for the Generation of Narrow-Band Radiation**

The invention concerns a laser for the generation of narrow-band radiation with a laser-active region, a decoupling mirror, a beam spreader and a wave-length selective element on which radiation impinges.

In particular, the invention concerns excimer lasers of the above-mentioned type.

The invention addresses the problem of generating, in such a laser, radiation that is as narrow band as possible, with high stability. This is important especially for use in photolithography for the production of integrated circuits. For this, wave lengths of less than 250 nm are necessary, in order to produce structures with dimensions of less than 0.25  $\mu\text{m}$ . (for structures with dimensions of less than 0.18  $\mu\text{m}$ , wave lengths of less than 200 nm are necessary). In such wave length ranges, achromatically imaging objects can hardly be manufactured. Therefore, the radiation used must have a very narrow bandwidth in order to keep the imaging errors due to chromatic aberration small. In the area of application of photolithography, which is the special focus of this invention, wave lengths in the range of less than 0.6  $\mu\text{m}$  are acceptable for refracting imaging optics.

Another important property of radiation in such applications is so-called spectral purity. The spectral purity of the radiation can for example, be indicated by its wave length interval in which 95% of the total impulse energy lies. The bandwidth and, to an every greater extent, the spectral purity of the radiation, are determined, among other things, by the divergence  $\theta$  or even by the wave front bending R of the beam. Fig. 1 shows schematically an excimer laser of the previous design, with a laser-active zone 1 (that is, the plasma of a gas discharge), a decoupling mirror 2, a beam spreader 3 and a wave-length selective element 5 in the form of a grid. The beam spreading element 3 serves to decrease the divergence and to decrease the wave front bending before the wave-length selective element 5. Fig. 2 shows schematically a beam where the boundary beam (and radius) is designated with R. OA is the optical axes and  $\theta$  is the divergence angle. For the distance h of the boundary point of the wave front of the optical axis OA, if no beam spreader is used, then  $\theta = h/R$ . This is represented in Fig. 2 on the left. In Fig. 2 on the right, the beam using a beam spreader is shown, where the spreading factor is M. In this case,  $h' = M \cdot h$ ;  $\theta' = \theta / M$ , and  $R' = M^2 \cdot R$ .

The state of technology already knows of an attempt to compensate for bending of the wave front (U.S. Patent 5,095,492; R.L. Sandstrom). There, the grid is changed, which however has disadvantages, especially with respect to the extent to which a wave front bending can be corrected. In a U.S. Patent Application (Inventor: D. Basting and S. Govorkov), an additional cylindrical lens is placed in the laser resonator to compensate for a wave front bending (U.S. Application of 6/22/1998).

The purpose of the invention is to conceive a laser of the type mentioned above, in such a manner that it is possible to correct the wave front band with simple and reliable means, and furthermore to monitor the status of the wave front distortion.

The invention achieves these goals by devices for adjusting the wave front, therefore especially to correct and change the wave front bending, where the devices include an optical element whose optical properties are changeable. Such a device is, for example, a changeable, especially a deformable, mirror.

One variant of the invention achieves the above-mentioned goals, using devices to measure a wave front and to provide a measurement result, as well as devices to adjust the wave front corresponding to the measurement results. This embodiment of the invention is especially suitable for providing a closed regulating loop in which the wave front is regulated to an optimum value, that is, a value with the minimum possible wave front bending.

The thought behind the invention can therefore be achieved either statically, with optical elements adjusted (fixed) optimally for a given laser system, and also (in a more advanced embodiment) dynamically by measuring the bending of the wave front and corresponding adjustment of a wave front correction, especially in the form of a regulating loop.

The invention therefore makes it possible to produce a wave front with the least possible bend, especially immediately before impinging on the wave-length selective element. The wave-length selective element can, preferably, be a grid, but other devices that are known to the expert may also be considered.

If a flat grid is used as a wave-length selective element, the highest spectral purity is reached if the wave front shows no bending, so that the bending radius  $R'$  (Fig. 2, on the right) approaches infinity. In practical laser systems, wave front bending cannot be avoided for several reasons, so that the above-mentioned correction devices, according to the invention, are required in order to produce narrow banded radiation. The causes of wave front bending are especially to be found in the fact that beams that are not exactly parallel to the optical axis of the laser, are also amplified in the resonator, the fact that the optical components as a rule do not have completely flat surfaces, the fact that in the volume of the optical components changes in the refractive indices may occur and the fact that the radiation itself can produce changes in the refractive index in the volume of the optical components.

As an optical element whose optical imaging properties can be changed in order to correct wave front bending, there comes into consideration in the above-mentioned devices in accordance with the invention especially a mirror that is deformable.

Further preferred embodiments of the invention are described in the subsidiary Production Claims.

In the following, sample embodiments of the invention will be described using the schematic drawings. The following are shown:

Fig. 1 a structure of an excimer laser as in the past;

- Fig. 2 laser beams with parameters of interest here, as explained above, to the left without and to the right with beam spreading;
- Fig. 3 a first sample embodiment of a laser in accordance with the invention;
- Fig. 4 a transformation of the devices for wave front correction in a laser system, according to Fig. 3;
- Fig. 5 and 6 examples for a distant field intensity distribution, namely without wave front correction (Fig. 5) and with wave front correction (Fig. 6);
- Fig. 7 and 8 show spectra measured as examples of laser radiation, without wave front correction (Fig. 7) and with wave front correction (Fig. 8); and
- Fig. 9 a second sample embodiment of a laser system with devices for wave front correction.

In the figures, components with the same function have the same reference symbols. In this regard, therefore, the laser-active medium 1, the decoupling mirror 2, the beam spreader 3 and the grid 5 in the laser system according to the invention as shown in Fig. 3 correspond to the previous structure of an excimer laser as shown in Fig. 1, above. In the figures, the beam spreader 3 is indicated symbolically by a single prism. In fact, beam spreaders as a rule consist of, for example, multiple prisms.

The light coming from the beam spreader 3 in the sample embodiment shown in Figure 3 therefore has a bent wave front (Fig. 2, right). This light is input into a device 4 to adjust the wave front. The device 4 has a deformable mirror 4a, from which the light is reflected to the grid 5. Furthermore, there is indicated schematically an actuating device 4b for deforming the mirror 4a. The actuating device 4b can be, for example, a mechanical device for deforming the mirror 4a, or a thermal device for this purpose. For example, the bend of the mirror 4a can be changed. The grid 5 selects wave lengths and reflects only a narrow banded range back to the mirror 4a. The radiation then arrives back at the beam spreader 3, where the beam width is compressed. Thereafter, the radiation again passes through the gas discharge chamber 1 and the laser-active medium and is further amplified there. A (small) portion of the radiation is deflected upward by means of a beam splitter 6a in Fig. 3. The beam splitter 6a is part of a device 6 to determine the wave front bending. After focusing by means of a lens 6d made of fused quartz, the radiation extracted arrives at a solid-state image sensor 6c (for example, a CCD array). The lens 6d has a focal length of  $f$  and the solid-state image sensor 6c is placed in the focal plane of the lens. The solid-state image sensor 6c determines the remote field intensity distribution of the radiation field in the laser resonator. The device 6 therefore provides an identifying value for the quality of the wave front. If the angle increase is still to be amplified, then an additional beam compressor can be placed in the beam path between the beam splitter 6a and the lens 6d.

The electrical measurement signal with respect to the remote field intensity distribution (and therefore of the wave front bend) provided by the solid-state image sensor 6c is supplied to a control 7, which again, using a computer, evaluates the data and, corresponding to the necessary correction of the wave front, acts upon the actuating device 4b in such a manner that the mirror 4a is deformed, until the wave front measured with the device 6 has an optimum (minimum) value. For this purpose, for example, the measured values from the solid-state image sensor can be compared with values stored in the computer of the device 7. The remote field intensity distribution on the axis is especially suitable for controlling the

adjustment device 4. The adjustment device 4, that is in the sample embodiment the deformable mirror 4a, is deformed in such a manner that the remote field intensity distribution is maximized on the axis. This adjustment is automatically done by the computer of the control 7.

Fig. 5 and 6 show measurement results. In these figures, the intensity (in arbitrary units) is shown over the wave length. What is measured is the intensity distribution in the remote field. Fig. 5 shows clearly the splitting of this intensity distribution with two peaks. This splitting is caused by the severe wave front interference, especially in the beam spreader. Fig. 6 shows the measurement results after correction of the wave front bending, using the correction devices 6 and 4, which are explained using Fig. 3. The splitting of the intensity distribution has substantially disappeared, which indicates that the wave front bending has been essentially suppressed by adjustment of the mirror 4a.

Fig. 7 and 8 show the spectra measured without compensation of the wave front bending (Fig. 7) and with compensation of wave front bending (Fig. 8). Due to the lacking of wave front correction, the spectrum of Fig. 7 shows a split in the spectral distribution into two separate frequencies.

Fig. 9 shows a further sample embodiment of a laser system with correction of the wave front bending. In this sample embodiment, a telescope 4' (for example, of the Cassegrain type), is simultaneously a part of the beam spreader and a device for correcting wave front bending. The telescope 4' contains two highly reflective mirrors 4a', 4b', each with elliptical shaped surfaces. The telescope 4' has two functions: for one thing, it causes a radiation expansion in the direction perpendicular to the gaps in the grid 5 and for another it causes wave front correction (straightening of the wave front bend). The wave front correction can be undertaken by adjusting the distance  $d$  between the two mirrors 4a' and 4b'. In the wave path between the telescope 4', a further beam spreader 3 is represented schematically. The other components are explained above with the same reference symbols using Fig. 3.

2027/24

1G-81 274  
LAMBDA PHYSIK

### SCHUTZANSPRÜCHE

1. Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich (1), einem Auskoppelspiegel (2), einem Strahlaufweiter (3) und einem wellenlängenselektiven Element (5), auf das Strahlung trifft, gekennzeichnet durch Einrichtungen (6) zum Messen einer von der Wellenfront der Strahlung abhängigen Größe und zum Abgeben eines Meßergebnisses, und Einrichtungen (4, 7) zur Korrektur der Wellenfront in Abhängigkeit von dem Meßergebnis.
2. Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich (1), einem Auskoppelspiegel (2), einem Strahlaufweiter (3) und einem wellenlängenselektiven Element (5), auf das Strahlung trifft, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (4a) zur Korrektur der Wellenfront, die auf das wellenlängenselektive Element (5) auftrifft, wobei die Einstelleinrichtung (4a) hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften veränderbar ist.
3. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen zum Korrigieren der Wellenfront ein in seinen optischen Eigenschaften veränderbares Element (4a) enthalten.
4. Laser nach einem der Ansprüche 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) verformbar ist.
5. Laser nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) ein Spiegel ist.
6. Laser nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) im Strahlengang zwischen zumindest einem Element (3; 3a) des Strahlaufweiters und dem wellenlängenselektiven Element (5) angeordnet ist.

7. Laser nach einem der Ansprüche 1 oder 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (6) zum Messen der Wellenfront einen Festkörper-Bildsensor (6c) aufweisen.
8. Laser nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (6) zum Messen der Wellenfront fokussierende optische Mittel (6b) aufweisen und daß der Festkörper-Bildsensor (6c) in der Fokusebene der abbildenden Elemente liegt.
9. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Meßeinrichtung (6) als Maß für die Wellenfrontkorrektur die Amplitude im Zentrum der Fernfeld-Intensitätsverteilung genutzt wird.
10. Laser gemäß Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (4') zum Einstellen der Wellenfront ein Teleskop (4a', 4b') aufweisen, insbesondere ein Cassegrain-Teleskop.
11. Laser nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenfront durch Einstellung eines Abstandes (d) von Elementen (4a', 4b') des Teleskops (4') einstellbar ist.
12. Laser nach einem der Ansprüche 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Teleskop Spiegel (4a', 4b') aufweist zum Reflektieren des Strahlenganges des Lasers und daß die Spiegel entsprechend einem Kegelschnitt geformt sind, insbesondere parabolisch, elliptisch oder hyperbolisch.
13. Laser nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest ein Spiegel des Teleskops deformierbar ist.
14. Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß er ein Excimerlaser ist.

1G-81 274  
LAMBDA PHYSIK

### Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung

Die Erfindung betrifft einen Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich, einem Auskoppelspiegel, einem Strahlaufweiter und einem wellenlängenselektiven Element, auf das Strahlung trifft.

Insbesondere betrifft die Erfindung Excimerlaser der vorstehend genannten Art.

Die Erfindung befaßt sich mit dem Problem, bei einem solchen Laser möglichst schmalbandige Strahlung mit hoher Stabilität zu erzeugen. Dies ist insbesondere beim Einsatz in der Fotolithographie zur Erzeugung integrierter Schaltungen wichtig. Hierzu sind Wellenlängen  $< 250$  nm erforderlich, um Strukturen mit Abmessungen  $< 0,25$   $\mu$ m zu erzeugen (für Strukturen mit Abmessungen  $< 0,18$   $\mu$ m sind Wellenlängen  $< 200$  nm erforderlich). In solchen Wellenlängenbereichen sind achromatisch abbildende Optiken kaum herstellbar. Deshalb muß die verwendete Strahlung sehr schmalbandig sein, um die Abbildungsfehler aufgrund der chromatischen Aberration klein zu halten. Im Einsatzbereich der Fotolithographie, um die es bei der vorliegenden Erfindung insbesondere geht, sind für brechende Abbildungsoptiken Bandbreiten im Bereich  $< 0,6$  pm akzeptabel.

Eine andere wichtige Strahlungseigenschaft bei solchen Verwendungen der Strahlung ist die sogenannte spektrale Reinheit. Die spektrale Reinheit der Strahlung kann z.B. durch dasjenige Wellenlängenintervall angegeben werden, in dem 95 % der gesamten Pulsenergie liegt. Die Bandbreite und in noch höherem Maß die spektrale Reinheit der Strahlung werden u.a. bestimmt durch die Divergenz  $\theta$  oder auch durch die Wellenfrontkrümmung  $R$  des Strahls. Fig. 1 zeigt schematisch einen herkömmlichen Excimerlaser mit einem laseraktiven Bereich 1 (also dem Plasma einer Gasentladung), einem Auskoppelspiegel 2, einem Strahlaufweiter 3



und einem wellenlängenselektiven Element 5 in Form eines Gitters. Das strahlaufweitende Element 3 dient zur Verringerung der Divergenz und zur Verringerung der Wellenfrontkrümmung vor dem wellenlängenselektiven Element 5. Fig. 2 zeigt schematisch einen Strahl, wobei der Randstrahl (und Radius) mit R bezeichnet ist. OA ist die optische Achse und  $\theta$  ist der Divergenzwinkel. Für den Abstand h des Randpunktes der Wellenfront von der optischen Achse OA gilt ohne Verwendung eines Strahlaufweiters  $\theta = h/R$ . Dies ist in Fig. 2 links dargestellt. In Fig. 2 rechts ist der Strahl bei Verwendung eines Strahlaufweiters gezeigt, wobei der Aufweitungsfaktor M ist. Dann gilt:  $h' = M \cdot h$ ;  $\theta' = \theta/M$ , und  $R' = M^2 \cdot R$ .

Der Stand der Technik kennt bereits einen Versuch, eine Wellenfrontkrümmung zu kompensieren (U.S. Patent 5,095,492; R.L. Sandstrom). Dort wird das Gitter verändert, was jedoch Nachteile hat, insbesondere hinsichtlich des Ausmaßes, in dem eine Wellenfrontkrümmung korrigiert werden kann. In einer U.S. Patentanmeldung (Erfinder: D. Basting und S. Govorkov) wird zur Kompensation einer Wellenfrontkrümmung eine zusätzliche Zylinderlinse in den Laserresonator eingesetzt (U.S. Anmeldung vom 22.6.1998).

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, einen Laser der eingangs genannten Art so auszugestalten, daß mit einfachen und zuverlässigen Mitteln eine Korrektur der Wellenfrontkrümmung möglich ist, und weiterhin der Status der Wellenfrontverzerrung kontrolliert werden kann.

Die Erfindung erreicht diese Ziele durch Einrichtungen zum Einstellen der Wellenfront, also insbesondere zum Korrigieren und Ändern der Wellenfrontkrümmung, wobei die Einrichtungen ein optisches Element aufweisen, dessen optische Eigenschaften veränderbar sind. Eine solche Einrichtung ist z.B. ein veränderbarer, insbesondere verformbarer Spiegel.

Eine Variante der Erfindung erreicht die oben genannten Ziele durch Einrichtungen zum Messen einer Wellenfront und zum Abgeben eines Meßergebnisses sowie durch Einrichtungen zum Einstellen der Wellenfront entsprechend dem Meßergebnis. Diese Ausgestal-



tung der Erfindung eignet sich besonders zur Einrichtung eines geschlossenen Regelkreises, bei dem die Wellenfront durch Messung jeweils auf einen optimalen Wert, d.h. einen Wert mit möglichst geringer Wellenfrontkrümmung, geregelt wird.

Der Erfindungsgedanke läßt sich also sowohl statisch mit auf für ein gegebenes Lasersystem optimal (fest) eingestellten optischen Elementen verwirklichen als auch (in einer fortgeschritteneren Ausgestaltung) dynamisch durch Messung der Wellenfrontkrümmung und entsprechender Einstellung einer Wellenfrontkorrektur, insbesondere in Form eines Regelkreises.

Die Erfindung ermöglicht also die Herstellung einer Wellenfront mit einer möglichst geringen Krümmung, insbesondere unmittelbar vor dem Auftreffen auf das wellenlängenselektive Element. Bei dem wellenlängenselektiven Element kann es sich bevorzugt um ein Gitter handeln, es kommen aber auch andere Einrichtungen in Betracht, die dem Fachmann bekannt sind.

Bei Verwendung eines ebenen Gitters als wellenlängenselektives Element wird die höchste spektrale Reinheit dann erreicht, wenn die Wellenfront keine Krümmung aufweist, also sich der Krümmungsradius  $R'$  (Fig. 2, rechts) gegen Unendlich nähert. Bei praktischen Lasersystemen läßt sich eine Wellenfrontkrümmung aus mehreren Gründen nicht vermeiden, so daß die oben genannten erfindungsgemäßen Korrekturvorrichtungen für die Erzeugung schmalbandiger Strahlung erforderlich sind. Die Ursachen der Wellenfrontkrümmung sind insbesondere darin zu sehen, daß Strahlen, die nicht exakt parallel zur optischen Achse des Lasers verlaufen, auch in dem Resonator verstärkt werden, daß die optischen Komponenten in aller Regel nicht völlig ebene Oberflächen haben, daß im Volumen der optischen Komponenten Änderungen des Brechungsindex auftreten können, und daß die Strahlung selbst Änderungen des Brechungsindex im Volumen der optischen Komponenten erzeugen kann.

Als optisches Element, dessen optische Abbildungseigenschaften zur Korrektur einer Wellenfrontkrümmung veränderbar sind, kommt bei den oben genannten erfindungsgemäßen Einrichtungen insbesondere ein Spiegel in Betracht, der verformbar ist.

Weitere bevorzugte Ausgestaltungen der Erfindung sind in den abhängigen Schutzansprüchen beschrieben.

Nachfolgend werden Ausführungsbeispiele der Erfindung anhand der schematischen Zeichnungen erläutert. Es zeigt:

- Fig. 1 einen herkömmlichen Aufbau eines Excimerlasers;
- Fig. 2 Laserstrahlen mit hier interessierenden Parametern, wie sie oben erläutert sind, links ohne und rechts mit Strahlaufweitung,
- Fig. 3 ein erstes Ausführungsbeispiel eines erfindungsgemäßen Lasers;
- Fig. 4 eine Abwandlung der Einrichtungen zur Wellenfrontkorrektur bei einem Lasersystem gemäß Fig. 3;
- Fig. 5 und 6 Beispiele für eine Fernfeld-Intensitätsverteilung, nämlich ohne Wellenfrontkorrektur (Fig. 5) und mit Wellenfrontkorrektur (Fig. 6);
- Fig. 7 und 8 zeigen beispielhaft gemessene Spektren von Laserstrahlung, einmal ohne Wellenfrontkorrektur (Fig. 7) und einmal mit Wellenfrontkorrektur (Fig. 8); und
- Fig. 9 ein zweites Ausführungsbeispiel eines Lasersystems mit Einrichtungen zur Wellenfrontkorrektur.

In den Figuren haben funktionsgleiche Bauteile die gleichen Bezugszeichen. Insoweit entsprechen also das laseraktive Medium 1, der Auskoppelspiegel 2, der Strahlaufweiter 3 und das Gitter 5 beim erfindungsgemäßen Lasersystem gemäß Fig. 3 einem herkömmlichen Aufbau eines Excimerlasers, wie er oben anhand der Fig. 1 erläutert ist. In den Figuren wird der Strahlaufweiter 3 durch ein einziges Prisma symbolisch angedeutet. Tatsächlich bestehen Strahlaufweiter in der Regel aus z.B. mehreren Prismen.

Das beim Ausführungsbeispiel gemäß Fig. 3 vom Strahlaufweiter 3 kommende Licht weist also eine gekrümmte Wellenfront auf (Fig. 2, rechts). Dieses Licht wird in eine Einrichtung 4 zum Einstellen der Wellenfront ingegeben. Die Einrichtung 4 weist einen deformierbaren Spiegel 4a auf, an dem das Licht zum Gitter 5 reflektiert wird. Weiterhin ist schematisch in Betätigungsein-

sitätsverteilung auf der Achse ein Maximum hat. Diese Einstellung wird automatisch durch den Rechner der Steuerung 7 durchgeführt.

Die Fig. 5 und 6 zeigen Meßergebnisse. In den Figuren ist die Intensität (in willkürlichen Einheiten) über der Wellenlänge aufgetragen. Gemessen ist die Intensitätsverteilung im Fernfeld. Fig. 5 zeigt deutlich die Aufspaltung dieser Intensitätsverteilung mit zwei Spitzen (peaks). Diese Aufspaltung wird durch die starke Wellenfrontstörung, insbesondere im Strahlaufweiter, verursacht. Fig. 6 zeigt die Meßergebnisse nach Korrektur der Wellenfrontkrümmung mittels der Korrektoreinrichtungen 6 und 4, die anhand der Fig. 3 erläutert wurden. Die Aufspaltung der Intensitätsverteilung ist im wesentlichen verschwunden, was anzeigt, daß die Wellenfront-Krümmung im wesentlichen zum Verschwinden gebracht worden ist durch Einstellung des Spiegels 4a.

Die Fig. 7 und 8 zeigen die gemessenen Spektren ohne Kompensation der Wellenfrontkrümmung (Fig. 7) und mit Kompensation der Wellenfrontkrümmung (Fig. 8). Auf Grund der fehlenden Wellenfrontkorrektur zeigt das Spektrum von Fig. 7 eine Aufteilung der spektralen Verteilung in zwei getrennte Frequenzen.

Fig. 9 zeigt ein weiteres Ausführungsbeispiel eines Lasersystems mit Korrektur der Wellenfront-Krümmung. Bei diesem Ausführungsbeispiel ist ein Teleskop 4' (z.B. vom Cassegrain-Typ) gleichzeitig Teil des Strahlaufweiters und Einrichtung zum Korrigieren einer Wellenfront-Krümmung. Das Teleskop 4' weist zwei hochreflektierende Spiegel 4a', 4b' auf, mit jeweils elliptisch geformten Oberflächen. Das Teleskop 4' hat zwei Funktionen: Zum einen bewirkt es eine Strahlaufweitung in Richtung senkrecht zu den Ritzen des Gitters 5 und zum anderen bewirkt es eine Wellenfrontkorrektur (Begradigung der Wellenfront-Krümmung). Die Wellenfrontkorrektur kann durch Einstellen des Abstandes d zwischen den beiden Spiegeln 4a' und 4b' vorgenommen werden. Im Strahlengang zwischen dem Teleskop 4' ist ein weiterer Strahlaufweiter 3 schematisch dargestellt. Die übrigen Bauteile sind mit gleichen Bezugszeichen anhand der Fig. 3 oben erläutert.

richtung 4b für die Deformierung des Spiegels 4a angedeutet. Bei der Betätigungseinrichtung 4b kann es sich z.B. um eine mechanische Einrichtung zum Deformieren (Verformen) des Spiegels 4a handeln oder auch um eine thermische Einrichtung für diesen Zweck. z.B. kann damit die Krümmung des Spiegels 4a geändert werden. Das Gitter 5 selektiert Wellenlängen und reflektiert nur einen schmalbandigen Bereich zurück zum Spiegel 4a. Die Strahlung gelangt dann wieder zurück zum Strahlaufweiter 3, wo die Strahlbreite komprimiert wird. Danach passiert die Strahlung wieder die Gasentladungskammer 1 und das laseraktive Medium und wird dort weiter verstärkt. Ein (geringer) Teil der Strahlung wird mittels eines Strahlteilers 6a in Fig. 3 nach oben abgelenkt. Der Strahlteiler 6a ist Teil einer Einrichtung 6 zum Ermitteln der Wellenfront-Krümmung. Nach Fokussierung durch eine Linse 6b aus Schmelzquarz, gelangt die abgezweigte Strahlung auf einen Festkörperbildsensor 6c (z.B. ein CCD-Array). Die Linse 6b hat eine Brennweite  $f$  und der Festkörperbildsensor 6c ist in der Brennebene der Linse angeordnet. Der Festkörperbildsensor 6c ermittelt die Fernfeld-Intensitätsverteilung des Strahlungsfeldes im Laserresonator. Die Einrichtung 6 ermittelt also eine Kenngröße für die Qualität der Wellenfront. Soll die Winkelvergrößerung noch verstärkt werden, kann ein zusätzlicher Strahl-Komprimierer im Strahlengang zwischen dem Strahlteiler 6a und der Linse 6b angeordnet werden.

Das vom Festkörperbildsensor 6c gelieferte elektrische Meßsignal bezüglich der Fernfeld-Intensitätsverteilung (und damit bezüglich der Wellenfront-Krümmung) wird an eine Steuerung 7 gegeben, die wiederum mittels eines Rechners die Daten auswertet und entsprechend der erforderlichen Korrektur der Wellenfront die Betätigungseinrichtung 4b so beaufschlagt, daß der Spiegel 4a verformt wird, bis die mit der Einrichtung 6 gemessene Wellenfront-Krümmung einen optimalen (minimalen) Wert hat. Hierzu können z.B. die gemessenen Werte des Festkörperbildsensors mit im Rechner der Einrichtung 7 gespeicherten Werten verglichen werden. Für die Steuerung der Einstelleinrichtung 4 eignet sich insbesondere die Fernfeld-Intensitätsverteilung auf der Achse. Die Einstelleinrichtung 4, also beim Ausführungsbeispiel der verformbare Spiegel 4a, wird so verformt, daß die Fernfeld-Inten-

1G-81 274  
LAMBDA PHYSIK

### SCHUTZANSPRÜCHE

1. Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich (1), einem Auskoppelspiegel (2), einem Strahlaufweiter (3) und einem wellenlängenselektiven Element (5), auf das Strahlung trifft, gekennzeichnet durch Einrichtungen (6) zum Messen einer von der Wellenfront der Strahlung abhängigen Größe und zum Abgeben eines Meßergebnisses, und Einrichtungen (4, 7) zur Korrektur der Wellenfront in Abhängigkeit von dem Meßergebnis.
2. Laser zur Erzeugung schmalbandiger Strahlung mit einem laseraktiven Bereich (1), einem Auskoppelspiegel (2), einem Strahlaufweiter (3) und einem wellenlängenselektiven Element (5), auf das Strahlung trifft, gekennzeichnet durch eine Einrichtung (4a) zur Korrektur der Wellenfront, die auf das wellenlängenselektive Element (5) auftrifft, wobei die Einstelleinrichtung (4a) hinsichtlich ihrer optischen Eigenschaften veränderbar ist.
3. Laser nach Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen zum Korrigieren der Wellenfront ein in seinen optischen Eigenschaften veränderbares Element (4a) enthalten.
4. Laser nach einem der Ansprüche 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) verformbar ist.
5. Laser nach Anspruch 4, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) ein Spiegel ist.
6. Laser nach einem der Ansprüche 2 bis 5, dadurch gekennzeichnet, daß das veränderbare Element (4a) im Strahlengang zwischen zumindest einem Element (3; 3a) des Strahlaufweiters und dem wellenlängenselektiven Element (5) angeordnet ist.

7. Laser nach einem der Ansprüche 1 oder 3 bis 6, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (6) zum Messen der Wellenfront einen Festkörper-Bildsensor (6c) aufweisen.
8. Laser nach Anspruch 7, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (6) zum Messen der Wellenfront fokussierende optische Mittel (6b) aufweisen und daß der Festkörper-Bildsensor (6c) in der Fokusebene der abbildenden Elemente liegt.
9. Laser gemäß Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß bei der Meßeinrichtung (6) als Maß für die Wellenfrontkorrektur die Amplitude im Zentrum der Fernfeld-Intensitätsverteilung genutzt wird.
10. Laser gemäß Anspruch 1 oder 2, dadurch gekennzeichnet, daß die Einrichtungen (4') zum Einstellen der Wellenfront ein Teleskop (4a', 4b') aufweisen, insbesondere ein Cassegrain-Teleskop.
11. Laser nach Anspruch 10, dadurch gekennzeichnet, daß die Wellenfront durch Einstellung eines Abstandes (d) von Elementen (4a', 4b') des Teleskops (4') einstellbar ist.
12. Laser nach einem der Ansprüche 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß das Teleskop Spiegel (4a', 4b') aufweist zum Reflektieren des Strahlenganges des Lasers und daß die Spiegel entsprechend einem Kegelschnitt geformt sind, insbesondere parabolisch, elliptisch oder hyperbolisch.
13. Laser nach einem der Ansprüche 10 bis 12, dadurch gekennzeichnet, daß zumindest ein Spiegel des Teleskops deformierbar ist.
14. Laser nach einem der vorhergehenden Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß er ein Excimerlaser ist.